

بررسی پارامترهای مؤثر در تولید بتن متخلخل

مجید رستمی گله دار *

دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران دانشگاه صنعتی اصفهان

ایمان بهرامی چگنی

مری و عضو هیأت علمی تمام وقت گروه عمران دانشگاه لرستان

چکیده

امروزه در اکثر جوامع پیشرفته دنیا به منظور اجرای روبه‌ها در پیاده‌روها، پارک‌ها و یا مکان‌های محل تردد و رفت‌وآمد با بار ترافیکی سبک، همانند خطوط ویژه عبور دوجرخه‌ها و یا پارکینگ خودروهای سبک، از ترکیبات بتنی متخلخل و نفوذپذیر به‌عنوان یک جای-گزین مناسب به‌جای روسازی‌های سخت و غیرقابل نفوذ در گذشته استفاده می‌گردد، بنابراین استفاده از بتن متخلخل در ساخت روبه‌ها چه از لحاظ کنترل سیلاب، توجیه اقتصادی و یا سازگاری با محیط زیست بیشتر از گذشته مورد توجه قرار گرفته است. در این مقاله، هدف تولید نوعی از بتن متخلخل است که علاوه بر معیارهای نفوذپذیری و تخلخل بالا، به لحاظ تحمل بارهای وارده، مقاومت فشاری بیشتر و نیز روانی بالاتری از خود نشان دهد. در این راستا چند نمونه سنگ‌دانه با مشخصه‌های فیزیکی، شیمیایی و دانه‌بندی‌های متفاوت با درصد‌های مختلف مواد افزودنی و سیمان با طرح اختلاط معین و با نسبت‌های مشخص مخلوط می‌شوند و انواعی از بتن‌های متخلخل با مقاومت‌های گوناگون در سنین مختلف تولید شد. پس از انجام آزمایش‌های اسلامپ، مقاومت فشاری، درجه تخلخل و نفوذپذیری روی نمونه‌های مختلف و بررسی و تفسیر نمودارها و تحلیل نتایج، مناسب‌ترین طرح اختلاط به لحاظ انطباق بر استانداردها و ارضای فاکتورهای مقاومتی و اقتصادی معرفی گردید.

واژه‌های کلیدی: بتن متخلخل، سنگ‌دانه، نفوذپذیری، تخلخل، مقاومت فشاری.

۱- مقدمه

همان‌گونه که می‌دانیم امروزه صنعت بتن نقش بسیار مهمی در ساخت‌وسازهای جوامع بشری ایفا می‌کند. در این راستا انجمن سیمان پرتلند (PCA) تحقیقاتی را به منظور استفاده از بتن در دیگر پروژه‌ها آغاز نموده؛ که پس از انجام آزمایشات و تحقیقات فراوان موفق شد به راه‌حل بسیار خوبی بنام بتن اسفنجی (بتن متخلخل) دست یابد. بتن اسفنجی توانست تحولات زیادی را در محوطه‌سازی‌های شهرهای اروپا و آمریکا ایجاد کند که به‌تازگی تحقیقاتی بر اثربخشی، عملکرد هیدرولیکی و همچنین روش‌های پاک کردن آن‌ها صورت گرفته است [۱-۳]. رویه‌های بتنی در یک دسته‌بندی به دو دسته صلب و انعطاف پذیر تقسیم می‌گردند. نمونه رویه‌های انعطاف‌پذیر، روسازی‌های آسفالتی و نمونه رویه‌های صلب، روسازی‌های بتنی می‌باشند. بتن متخلخل^۱ یکی از انواع روسازی‌های صلب می‌باشد. که مهم‌ترین مزیت آن توانایی بالای زهکشی آب‌های سطحی است که باعث برگشت آب به منابع زیرزمینی به صورت تصفیه‌شده و همچنین جلوگیری از جاری شدن رواناب و یا کاهش دبی حداکثر رواناب بر روی سطوح رویه‌ها می‌گردد. بتن متخلخل عموماً با حذف مصالح ریزدانه در طرح اختلاط و یا پایین آوردن درصد ریزدانه‌ها حاصل می‌شود؛ که این خود با افزایش درصد تخلخل، سرعت عبور آب از بافت بتنی را افزایش می‌دهد. بتن متخلخل از نظر زیست‌محیطی مزایای فراوانی دارد که امروزه توجه خاصی به همین موضوع شده است. از جمله این مزایا می‌توان به جلوگیری از جاری شدن رواناب‌ها، تغذیه ذخایر تحت‌الارضی و جلوگیری از آلودگی آب و خاک اشاره نمود [۴].

بتن متخلخل در اجزاء رویه‌ای و غیر رویه‌ای کاربرد دارد. کاربرد این نوع بتن در رویه‌ها در سه قسمت از سازه روسازی (لایه رویه^۲، اساس نفوذپذیر^۳، زه‌کش و شانه جاده) می‌باشد.

بتن متخلخل در ایالات متحده نخستین بار در پارکینگ‌ها و راه‌های سرویس^۴ مورد استفاده قرار گرفت [۵]. کاربردهای غیر رویه‌ای بتن متخلخل عبارتند از:

۱- دیوارهای سازه‌ای هنگامی که سبکی و عایق بودن سازه مهم باشد.

۲- لایه زهکش صلب زیر پیاده‌روهای پردرخت

۳- خاکریز پل‌ها

۴- محوطه استخرهای شنا

۵- سازه‌های ساحلی

۶- حوضچه‌های تصفیه‌خانه‌های فاضلاب

۷- زمین‌های تنیس، باغ‌وحش و کف گلخانه‌ها [۵].

معمولاً درصد تخلخل این نوع بتن بین ۱۵ تا ۲۵ درصد می‌باشد و نفوذپذیری آن نیز حدود ۲ تا ۶ میلی‌متر بر ثانیه است [۴].

با توجه به ساختار متخلخل این نوع بتن و در نتیجه کاهش مقاومت آن، استفاده از بتن متخلخل در مکان‌های با بارهای ترافیکی سنگین همانند بزرگراه‌ها و فرودگاه‌ها توصیه نمی‌گردد، مگر این که تدابیر خاص اعمال شود؛ و در عوض در روسازی‌های با بار ترافیکی سبک همانند پارکینگ‌ها، پیاده‌روها و دیگر مناطق روکش شده استفاده می‌گردد [۶]. روش‌های مختلفی از جمله استفاده از پودر و ژل میکروسیلیس جهت بهبود ویژگی‌های مکانیکی و دوام بتن متخلخل مورد بررسی قرار گرفته که معمولاً باعث کاهش نسبت تخلخل و در نتیجه نفوذپذیری آن خواهد شد [۷-۹].

از آنجایی که سنگ‌دانه‌ها تقریباً سه چهارم حجم بتن را تشکیل می‌دهند و دوام و پایداری بتن تا حد زیادی تحت تأثیر این مواد است، بنابراین دانه‌بندی و جنس سنگ‌دانه‌ها از پارامترهایی هستند که در مخلوط‌های بتنی نقش بسیار مؤثری دارند. تغییر دانه‌بندی در بتن باعث تغییر مقاومت بتن متخلخل خواهد شد، همچنین در میزان نفوذپذیری بتن‌های متخلخل نقش مؤثری دارد. البته جنس سنگ‌دانه‌ها هم در مقاومت فشاری بتن متخلخل نقش مؤثری دارد [۱۰].

مطالعات قبلی نشان داده است که سنگ‌دانه‌های شکسته نسبت به سنگ‌دانه‌های گردگوشه به خمیر سیمان بیشتری برای ایجاد کارایی نیاز دارند، ولی چسبندگی بین خمیر و سنگ‌دانه و نیز

3- Permeable Base

4- Service Roads

1 Pervious Concrete

2- Surface Layer

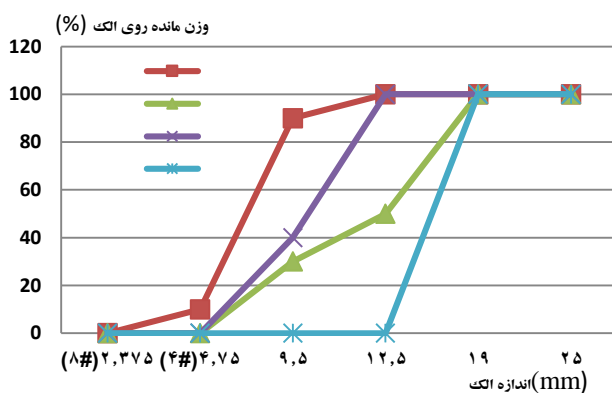


شکل ۱- سنگ‌دانه‌های مورد استفاده

جدول ۲- محدوده دانه‌بندی سنگ‌دانه‌ها

شماره الک	درصد وزنی مانده روی الک			
	دانه‌بندی A	دانه‌بندی B	دانه‌بندی C	دانه‌بندی D
8	٪۱۰	۰	۰	۰
4	٪۸۰	٪۳۰	٪۴۰	۰
3/8	٪۱۰	٪۲۰	٪۶۰	۰
1/2	۰	٪۵۰	۰	٪۱۰۰
3/4	۰	۰	۰	۰

منحنی دانه‌بندی‌های مختلف سنگ‌دانه‌ها در شکل ۲ آمده است. با توجه به شکل ۲ واضح است که در بتن متخلخل، دانه‌بندی سنگ‌دانه‌ها بیشتر به صورت یکنواخت و در دسته بد دانه‌بندی^۴ شده قرار دارند. در این تحقیق همچنین از فوق روان کننده (HRWR) بر پایه پلی‌کربوکسیلیک اصلاح شده استفاده شد.



شکل ۲- منحنی دانه‌بندی سنگ‌دانه‌های با جنس مختلف

مقاومت در سنگ‌دانه‌های شکسته نسبت به گرد گوشه بیشتر است [۱۱-۱۳].

در تحقیق حاضر با انجام یک سری مطالعات آزمایشگاهی، نخست نسبت آب به سیمان بهینه تعیین شده و سپس اثرات جنس سنگ‌دانه‌ها و نوع دانه‌بندی بر مقاومت فشاری، نفوذپذیری و تخلخل بتن متخلخل بررسی می‌شود.

۲- مطالعات آزمایشگاهی

۱-۲- مصالح مورد استفاده

در انجام این تحقیق از سیمان پرتلند معمولی تیپ یک کارخانه سیمان دورود استفاده شده است. خصوصیات سیمان انتخابی طبق استاندارد ASTM C150 [۱۴] می‌باشد و نتایج آنالیز شیمیایی آن در جدول ۱ آمده است.

نرمی سیمان مورد استفاده حدود $3100 \text{ cm}^2/\text{gr}$ بوده و مقاومت فشاری ۲۸ روزه آن 365 kg/cm^2 می‌باشد.

جدول ۱- آنالیز شیمیایی سیمان پرتلند تیپ یک کارخانه سیمان دورود

کربنات	SiO ₂	AL ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O
درصد وزنی	۲۲/۶	۵/۳	۳/۷	۶۲/۴	۱/۶	۱/۸	۰/۸

در انجام این تحقیق از سه نوع سنگ‌دانه با جنس‌های مختلف شامل سنگ آهک^۱ (LS)، مرمریت^۲ (M) و گرانیت مشکی^۳ (BG) از معادن کوهی استفاده شد، (شکل ۱). این سنگ‌دانه‌ها با قرار گرفتن در دستگاه سنگ‌شکن خورد شده و در محدوده‌های مجاز دانه‌بندی شن و ماسه تفکیک شدند.

در انجام این تحقیق با در نظر گرفتن محدوده‌های مجاز جهت دانه‌بندی مصالح سنگی در بتن متخلخل و در محدوده استاندارد ASTM C136 [۱۵]، چهار نوع دانه‌بندی مختلف جهت ساخت بتن متخلخل انتخاب شد، (جدول ۲).

³ Black Granite

⁴ -Poorly Graded

¹ Lime stone

² Marble

جدول ۳- طرح اختلاط

شماره طرح	سنگدانه (Kg/m ³)	دانه بندی	آب (Kg/m ³)	HRWR/C (%)
۱	۱۸۹۰ (LS)	A	۱۰۵	۰/۸
۲	۱۸۹۰ (LS)	B	۱۰۵	۰/۸
۳	۱۸۹۰ (LS)	C	۱۰۵	۰/۸
۴	۱۸۹۰ (LS)	D	۱۰۵	۰/۸
۵	۱۸۹۰ (M)	A	۸۷/۵	۰/۶
۶	۱۸۹۰ (M)	B	۸۷/۵	۰/۶
۷	۱۸۹۰ (M)	C	۸۷/۵	۰/۶
۸	۱۸۹۰ (M)	D	۸۷/۵	۰/۶
۹	۱۸۹۰ (BG)	A	۸۷/۵	۰/۶
۱۰	۱۸۹۰ (BG)	B	۸۷/۵	۰/۶
۱۱	۱۸۹۰ (BG)	C	۸۷/۵	۰/۶
۱۲	۱۸۹۰ (BG)	D	۸۷/۵	۰/۶

۲-۲- طرح اختلاط، ساخت نمونه‌ها و عمل آوری

در این تحقیق با توجه به تفاوت در مشخصه‌های فیزیکی و شیمیایی سنگ‌دانه‌ها، به منظور کنترل نسبت آب به سیمان و با در نظر گرفتن عیار سیمان برابر با 350 kg/m^3 به تعیین میزان نسبت آب به سیمان با در نظر گرفتن معیار روانی (اسلامپ) و کارپذیری و نیز جلوگیری از خروج شیره بتن طبق استاندارد ASTM C143 [۱۹] پرداخته شد. در اینجا ذکر این نکته مهم ضروری است، که در بتن‌های معمولی بیرون زدگی شیره معمولاً در اثر تراکم نادرست و در حین جا دادن بتن اتفاق می‌افتد و حال آن‌که در بتن‌های متخلخل به دلیل نبودریز دانه خروج شیره بتن زودتر و در همان لحظات اولیه و در اثر عدم توجه به نسبت آب به سیمان مناسب رخ می‌دهد، به عبارتی در کنترل نسبت آب به سیمان اثر توأم روانی و عدم خروج شیره بتن به صورت هم‌زمان اعمال می‌شود، که در ادامه مقادیر بهینه نسبت آب به سیمان (W/C) و نیز نسبت فوق روان کننده به سیمان (HRWR/C) به دست آمد.

با ساخت نمونه‌های متعدد مرمریت در انواع دانه بندی‌های A، B، C و D با یکسان در نظر گرفتن عیار سیمان (350 kg/m^3)، برای W/C بزرگ‌تر از ۰/۳ و HRWR/C بزرگ‌تر از ۰/۶ بیرون زدگی شیره بتن همواره وجود دارد و با تکرار آزمایش‌های متعدد نسبت بهینه W/C و HRWR/C به ترتیب برابر ۰/۲۵ و ۰/۰۶ به دست آمد. در جدول ۳ طرح اختلاط‌های مختلف و همچنین مقادیر بهینه W/C و HRWR/C برای سایر سنگ‌دانه‌های آهکی و گرانیتی ذکر شده است.

کلیه مصالح پس از آماده شدن با درصدهای معین طرح اختلاط، در یک مخلوط‌کن با جام ثابت ریخته و باهم مخلوط می‌شوند. جهت افزودن فوق روان کننده پس از افزودن کمی بیشتر از نصف آب مصرفی، فوق روان کننده در جام ریخته شده و سپس بقیه آب به طرح اضافه می‌شود. جهت تهیه نمونه‌های مورد نیاز از قالب‌های مکعبی $150 \times 150 \times 150$ میلی‌متر چدنی استفاده شد. نمونه‌های ساخته شده به مدت ۲۴ ساعت در شرایط معمولی آزمایشگاه (دمای 23 ± 2 درجه سانتی‌گراد) و زیر پلاستیک نگهداری شد و سپس نمونه‌ها از قالب خارج و تا زمان آزمایش در حوضچه آب قرار گرفتند.

۳- نحوه انجام آزمایشات، نتایج و بحث

۳-۱- آزمایش سنگ‌دانه‌ها

برای هر کدام از سنگ‌دانه‌ها ابتدا آزمایش‌های لس آنجلس (سایش) طبق استاندارد ASTM C131 [۱۶]، جذب آب طبق استاندارد ASTM C127 [۱۷] و رطوبت طبق استاندارد ASTM C566 [۱۸] انجام شد که نتایج این آزمایشات به ترتیب در جدول ۴، جدول ۵ و جدول ۶ آمده است.

از مقایسه نتایج آزمایشگاهی فوق روی سنگ‌دانه‌ها مشاهده می‌شود، که سنگ‌دانه‌های گرانیتی به لحاظ مقاومت سایشی نسبت به سایر سنگ‌دانه‌ها مقاوم‌تر عمل می‌نمایند و درصد جذب آب و نیز رطوبت این سنگ‌دانه‌ها نسبت به سایر سنگ‌دانه‌ها کمتر است. که این خود مزیت بالای استفاده از این سنگ‌دانه‌ها را در بتن متخلخل نشان می‌دهد؛ اما متأسفانه هزینه تهیه و دانه بندی این سنگ‌دانه‌ها نسبت به سایر سنگ‌دانه‌ها بیشتر است. پس از سنگ‌دانه‌های گرانیتی، به لحاظ نتایج سایش و جذب آب و رطوبت، می‌توان سنگ‌دانه‌های مرمریت را در اولویت بعدی قرار

V_1 : درصد تخلخل و V_2 : حجم نمونه بتنی و V_2 : حجم آب جابه‌جا شده می‌باشد که حجم آب جابه‌جا شده از ضرب مقدار آب بالا آمده در سطح مقطع ظرف به دست می‌آید. نتایج آزمایش تخلخل در جدول ۷ آمده است.

جدول ۷ - نتایج آزمایش تخلخل

شماره طرح	تخلخل (%)	شماره طرح	تخلخل (%)
۱	۲۲/۶	۷	۳۰/۴
۲	۲۵/۵	۸	۳۱/۸
۳	۲۹/۴	۹	۱۸/۸
۴	۳۰/۴	۱۰	۲۱/۲
۵	۲۴/۶	۱۱	۲۷/۵
۶	۲۶/۵	۱۲	۲۹/۴

باتوجه به جدول ۷، طرح شماره ۸ (سنگ‌دانه‌های مرمیت در محدوده دانه‌بندی درشت‌دانه) و طرح شماره ۹ (سنگ‌دانه‌های گرانیتی در محدوده دانه‌بندی با اندازه حداقل) به ترتیب دارای بیشترین و کمترین میزان تخلخل می‌باشد. بررسی نتایج حاصل از جدول ۷ در خصوص آزمایش تست تخلخل، بیانگر آن است که در تمامی طرح‌های ساخته شده، با حرکت از دانه‌بندی A به B میزان تخلخل افزایش می‌یابد، که علت این پدیده را باید در افزایش حداکثر اندازه سنگ‌دانه‌ها و نیز حرکت به سمت دانه‌بندی یکنواخت جستجو نمود؛ اما در اینجا یک حالت استثناء وجود دارد و آن این که دانه‌بندی B اگرچه در مقایسه با دانه‌بندی C محدوده درشت‌دانه‌تری را پوشش می‌دهد، اما تخلخل نمونه بتنی حاصله کمتر است، که علت را باید در نوع منحنی دانه‌بندی جستجو نمود. به عبارتی از آنجا که دانه‌بندی B در واقع محدوده دانه‌بندی بیشتری را پوشش می‌دهد (به سمت منحنی خوب دانه‌بندی شده حرکت می‌نماید)، علیرغم حداکثر اندازه سنگ‌دانه بزرگ‌تر نسبت به نمونه تولید شده با دانه‌بندی C، تخلخل کمتری در نمونه بتنی ایجاد می‌کند. همچنین نمونه‌های ساخته شده از سنگ‌دانه‌های مرمیتی باتوجه به کاهش نسبت آب به سیمان و نیز فوق روان‌کننده کمتر، در مقایسه با طرح‌های ساخته شده از سنگ‌دانه‌های آهکی تخلخل

داد، که هزینه تهیه و دانه‌بندی کمتری نسبت به نوع گرانیتی دارند و می‌توان به‌عنوان اولویت مطرح در ساخت بتن متخلخل این نوع سنگ‌دانه‌ها را مورد توجه قرار داد.

جدول ۴ - درصد سایش سنگ‌دانه‌ها

جنس سنگ‌دانه	وزن اولیه نمونه (W_1) (gr)	وزن ثانویه نمونه (W_2) (gr)	درصد سایش $[(W_1 - W_2) / W_1] * 100$ (%)
آهکی	۵۰۰۰	۳۶۸۰/۳	۲۶/۳۹
مرمیت	۵۰۰۰	۳۸۸۳/۶	۲۲/۳۳
گرانیت	۵۰۰۰	۴۴۲۱/۳	۱۱/۵۷

جدول ۵ - آزمایش جذب آب سنگ‌دانه‌ها

نوع سنگ	وزن نمونه خشک شده در هوا A (gr)	وزن نمونه اشباع با سطح خشک در هوا B (gr)	درصد جذب آب $[(B - A) / A] * 100$ (%)
آهکی	۳۰۰۰	۳۰۶۴/۲	۲/۱۴
مرمیت	۳۰۰۰	۳۰۲۱	۰/۷
گرانیت	۳۰۰۰	۳۰۰۹	۰/۳

جدول ۶ - نتایج آزمایش کل رطوبت سنگ‌دانه‌ها

نوع سنگ	وزن اولیه نمونه مرطوب W (gr)	وزن نمونه خشک شده D (gr)	رطوبت کلی نمونه $[(W - D) / D] * 100$ (%)
آهکی	۱۵۰۰	۱۴۹۷/۹	۰/۱۴
مرمیت	۱۵۰۰	۱۴۹۶/۶	۰/۲۳
گرانیت	۱۵۰۰	۱۴۹۷/۲	۰/۱۹

۲-۳- آزمایش تخلخل

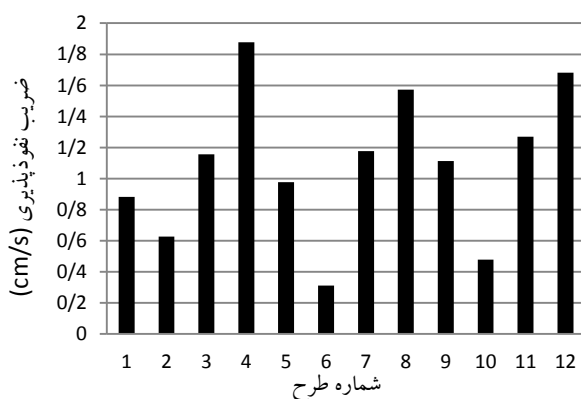
درصد تخلخل نمونه‌های بتنی تهیه شده بر اساس استاندارد ASTM C1688 [۲۰] اندازه‌گیری شد. بدین منظور نمونه بتن متخلخل در ظرف مخصوصی با سطح مقطع و ارتفاع معین، در آب غوطه‌ور شده تا هوای داخل نمونه تخلیه شود. سپس مقدار بالا آمدن آب اندازه‌گیری شده و درصد تخلخل از رابطه (۱) محاسبه می‌شود:

$$v = \frac{V_1 - V_2}{V_1} \times 100 \quad (1)$$

K: ضریب نفوذپذیری برحسب cm/s ، V: حجم آب عبوری از نمونه از زمان t_1 تا t_2 ، L: ارتفاع نمونه بتنی بر حسب cm ، A: سطح مقطع نمونه بتنی برحسب cm^2 و h: اختلاف تراز سطح آب در بالا و پایین نمونه برحسب cm می‌باشد.



شکل ۳- تجهیزات جهت انجام آزمایش نفوذپذیری



شکل ۴- نتایج آزمایش نفوذپذیری

باتوجه به شکل ۴ مشاهده می‌شود که میزان نفوذپذیری با یکنواختی بافت دانه‌بندی ارتباط مستقیم دارد. به عبارتی از آنجا که نفوذپذیری در واقع بیانگر مقاومت اصطکاکی بافت درونی محیط متخلخل در برابر عبور سیال است، با هم‌اندازه شدن دانه‌ها مقاومت مذکور کاهش یافته و نفوذپذیری افزایش می‌یابد. در آزمایش مذکور دانه‌بندی D در تمامی سنگ‌دانه‌ها بیشترین یکنواختی را دارا می‌باشد، لذا تمامی طرح‌های اختلاط بتن متخلخل مربوط به

بیشتری دارند، اما در مقایسه با طرح‌های ساخته شده از سنگ‌دانه‌های گرانیتی با وجود شرایط مشابه نسبت آب به سیمان و نیز فوق روان کننده‌ها، شرایط برعکس می‌شود، بدین معنا که سنگ‌دانه‌های گرانیتی تخلخل کمتری از خود نشان می‌دهند، که علت این پدیده را در حداقل بودن درصد جذب آب و نیز بیشتر بودن رطوبت سنگ‌دانه‌های گرانیتی باید دانست، که خود به نحوی در بالا بردن روانی و کارایی طرح‌های ساخته شده از سنگ‌دانه‌های گرانیتی و پایین آوردن درصد تخلخل آن‌ها مؤثر است. لازم به ذکر است که با توجه به محدوده‌ی آیین‌نامه‌ای درصد تخلخل (۱۵-۲۵ درصد) جهت استفاده از بتن‌های متخلخل در لایه‌های رویه، تمامی سنگ‌دانه‌ها با دانه‌بندی A و B در آزمایش فوق قابلیت استفاده در بتن‌های رویه در روسازی‌ها را دارا می‌باشند، مشروط بر آن که تست‌های نفوذپذیری و مقاومت فشاری را نیز ارضاء نمایند.

۳-۳- آزمایش نفوذپذیری^۱

به‌منظور انجام تست نفوذپذیری، باتوجه به محدوده بالای نفوذپذیری بتن‌های متخلخل از روش آزمایش نفوذپذیری با بار ثابت استفاده می‌شود. جنس ظرف آزمایش از نوع پلکسی گلاس^۲ بوده و ابعاد داخلی ظرف آزمایش 160×160 میلی‌متر و ارتفاع آن 500 میلی‌متر می‌باشد (شکل ۳). به‌منظور جلوگیری از تأثیر تمرکز سیمان، نمونه‌ها از بالا و پایین به میزان $2/5$ سانتیمتر (معادل ۱ اینچ) برش زده می‌شود. برای جلوگیری از نشست آب از کنارهای نمونه، ابتدا نمونه به وسیله پارافین آب‌بندی شده، سپس در ظرف آزمایش قرار می‌گیرد.

برای اندازه‌گیری نفوذپذیری، زمان تغییرافت هد آب با استفاده از فرمول داری به‌دست آمد. ارتفاع ستون آب جهت اندازه‌گیری نفوذپذیری، طوری تعیین می‌گردد که معمولاً روسازی‌ها این هد را تجربه می‌کنند (حدود 20 cm). ضریب نفوذپذیری از رابطه (۲) قابل محاسبه است که نمودار نتایج در شکل ۴ نشان داده شده است.

$$K = \frac{V.L}{A.h(t_2-t_1)} \quad (2)$$

² Plexiglas

¹ Permeability Test

این نوع دانه بندی بیشترین نفوذپذیری را از خود نشان می دهند. در یک جمع بندی کلی می توان گفت، نفوذپذیری بتن متخلخل به عواملی از قبیل تخلخل، توزیع و اندازه حفره های درونی، اصطکاک جداره حفره ها (همان عامل ضریب زبری در علم هیدرولیک) و همچنین پیچ و خم ها و نحوه ارتباط کانال های میان حفره ها بستگی دارد.

میان آنها مشاهده می شود، که همین امر در بالا بردن هدایت هیدرولیکی بتن متخلخل بسیار مؤثر است. باتوجه به جدول ۸ طرح های ساخته شده از سنگ دانه های گرانیتی بیشترین مقاومت فشاری را از خود نشان می دهند؛ که علت این امر می تواند مقاومت سنگ دانه ها باشد. همچنین با دقت در سطوح شکست نمونه های شکسته از سنگ دانه های گرانیتی در محدوده دانه بندی های C و D نشان می دهد که عمدتاً سطوح شکست از فضای بین سنگ دانه ها عبور کرده است، که این خود لزوم استفاده از چسباننده های قوی تر و سایر افزودنی ها و تغییرات در درصد های اختلاط به منظور رسیدن به مقاومت بالاتر را می طلبد. پس از طرح های با سنگ دانه گرانیتی، طرح های با سنگ دانه مرمریت و آهکی به ترتیب در رده های دوم و سوم مقاومتی قرار دارند، که در هر دو دسته اخیر سطوح شکست تماماً از وسط سنگ دانه ها عبور نموده است.

جدول ۸ - نتایج آزمایش مقاومت فشاری

شماره طرح	مقاومت فشاری (MPa)	شماره طرح	مقاومت فشاری (MPa)
۱	۱۴/۵۲	۷	۱۳/۹۱
۲	۱۶/۵۴	۸	۱۱/۲۶
۳	۱۲/۷	۹	۱۷/۱
۴	۷/۱۶	۱۰	۲۴/۴
۵	۱۶/۱۵	۱۱	۱۵/۶
۶	۲۰/۹۷	۱۲	۱۳/۲



شکل ۵- نمونه ترک خورده بتنی با سنگ دانه آهکی

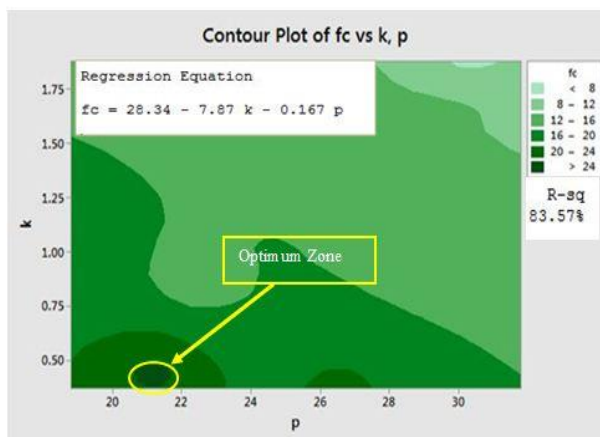
آنچه امروزه به عنوان مقاومت فشاری بتن های متخلخل معرفی می شود، در واقع محدوده ی بین (۳/۵-۲۸) مگا پاسکال است؛ که در همین محدوده نیز کاربردهای متعددی جهت بتن متخلخل وجود دارد، اما به این نکته نیز باید دقت شود، که تاکنون آزمایش استاندارد جهت اندازه گیری مقاومت فشاری بتن های متخلخل در استانداردهای ارائه شده توسط سازمان بین المللی توسعه استانداردها (ASTM) ارائه نشده است. که این امر خود به علت پراکندگی بالای نتایج مقاومت های فشاری با روش های مختلف اندازه گیری هست. با توجه به این نکته می توان گفت برخلاف بتن های معمولی، در بتن های متخلخل مقاومت فشاری به عنوان تنها ملاک پذیرش بتن تلقی نمی شود، بلکه به موازات مقاومت فشاری، تخلخل و نفوذپذیری هم حائز اهمیت می باشند. در این تحقیق جهت انجام آزمایش مقاومت فشاری از استاندارد ASTM C39 [۲۱] استفاده شد. به دلیل ناهمواری سطوح زیرین و فوقانی نمونه، ابتدا عملیات کپینگ^۲ با استفاده از گچ دندان پزشکی طبق استاندارد ASTM C617 [۲۲] انجام شد. نتایج آزمایش مقاومت فشاری در جدول ۸ آمده است.

۳-۴- آزمایش مقاومت فشاری^۱

در شکل ۵، یک نمونه بتنی متخلخل شکسته با سنگ دانه های آهکی نمایش داده شده است. همان گونه که از شکل مشخص است، سطوح شکست از وسط سنگ دانه ها عبور کرده که نشان دهنده طرح اختلاط مناسب بتن متخلخل مورد نظر است. تقریباً در تمامی طرح ها همین اتفاق به وضوح مشاهده شد. همچنین توزیع مناسب دانه بندی در شکل ۵ به وضوح مشخص است، که همه این عوامل در جهت مثبت بوده و به تقویت مقاومت فشاری کمک می کنند. از طرف دیگر با دقت در شکل ۵، حفرات و فضاهای خالی و نحوه ارتباط

² Capping¹ Compressive Strength

باتوجه به شکل ۷، میزان همبستگی نتایج حاصله از تست مقاومت فشاری و تخلخل پایین است، به عبارتی با داشتن مقادیر تخلخل با قطعیت نمی‌توان در مورد نحوه تغییرات مقاومت فشاری برای دانه‌بندی‌های مختلف قضاوت نمود، با وجود آن‌که نتایج تحقیقاتی که تاکنون در این خصوص انجام شده با ثابت نگه‌داشتن نوع دانه‌بندی و تغییرات در سایر اجزاء طرح اختلاط بتن متخلخل این همبستگی را تأیید نموده است. اما در این تحقیق باید دقت نمود که در طرح‌های اختلاط مختلف متغیر مورد بحث تغییرات در جنس و نوع منحنی دانه‌بندی است. که همین عامل خود در پدید آمدن عدم همبستگی بین نتایج مؤثر هست. به‌عنوان مثال در عبور از طرح اختلاط نمونه‌هایی با دانه‌بندی A به نمونه‌های با دانه‌بندی B، با وجود افزایش تخلخل، مقاومت فشاری نیز افزایش می‌یابد. که این پدیده خود به علت دانه‌بندی مناسب‌تر و به عبارتی حرکت دانه‌بندی به سمت خوب دانه‌بندی تر هست؛ و متعاقباً در سایر طرح‌های شماره ۲، ۶ و ۱۰ برای انواع سنگ‌دانه‌ها همین شرایط حاکم هست، که بر عامل افزایش تخلخل غلبه کرده و افزایش مقاومت فشاری را ایجاد نموده است؛ اما در بقیه نمونه‌ها با افزایش تخلخل مقاومت فشاری کاهش یافته است. موارد ذکر شده در بالا را از تحلیل آماری به کمک نرم‌افزار MINITAB نیز می‌توان نتیجه گرفت، که نتایج آن در شکل ۸ آمده است.

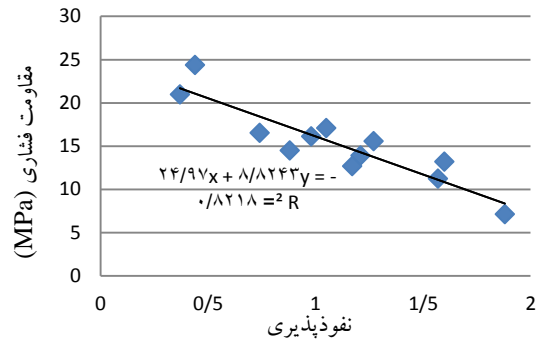


شکل ۸- تحلیل رگرسیون خطی هم‌زمان بین مقاومت فشاری و تخلخل و نفوذپذیری

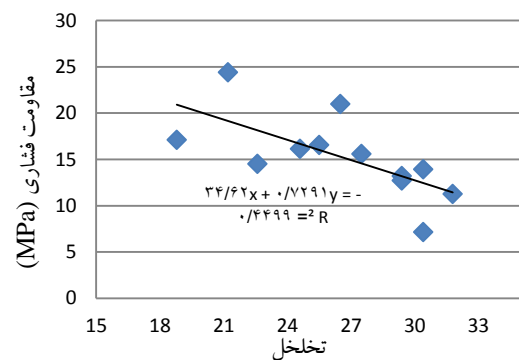
نتیجه همبستگی در رگرسیون خطی هم‌زمان بین مقادیر متغیرهای مستقل تخلخل (P) و نفوذپذیری (K) با متغیر وابسته مقاومت

۳-۵- ارتباط مقاومت فشاری با نفوذپذیری و تخلخل

تحلیل آماری نتایج به‌دست آمده حاصل از مقایسه مقادیر مقاومت فشاری با نفوذپذیری و نیز تخلخل نمونه‌ها به ترتیب در شکل ۶ و در شکل ۷ نشان داده شده است



شکل ۶- تحلیل رگرسیون خطی بین مقاومت فشاری و نفوذپذیری



شکل ۷- تحلیل رگرسیون خطی بین مقاومت فشاری و تخلخل

باتوجه به شکل ۶ مشخص است که همبستگی بالایی بین مقادیر به‌دست آمده حاصل از نتایج آزمایش مقاومت فشاری و نفوذپذیری وجود دارد. به عبارتی باتوجه به آن‌که در عبور از طرح اختلاط نمونه‌های با دانه‌بندی A به نمونه‌های با دانه‌بندی B، مقاومت فشاری با توجه به بافت مناسب‌تر دانه‌بندی افزایش می‌یابد، میزان نفوذپذیری کاهش یافته و در سایر نمونه‌ها با کاهش مقاومت فشاری، نفوذپذیری افزایش می‌یابد؛ و یا می‌توان گفت این ارتباط معکوس در تمامی طرح‌ها بین مقاومت فشاری و نفوذپذیری برقرار است، که این خود باعث افزایش همبستگی نتایج به میزان بالاتر از ۸۰ درصد شده است.

می‌باشد. که این خود مزیت بالای استفاده از این سنگ‌دانه در بتن متخلخل را نشان می‌دهد.

۲- نتایج آزمایش تخلخل نشان می‌دهد که جهت استفاده از بتن‌های متخلخل در لایه‌های رویه، تمامی سنگ‌دانه‌ها با دانه‌بندی A و B قابلیت استفاده در بتن‌های رویه در روسازی را دارا می‌باشند.

۳- تمامی طرح‌های اختلاط بتن متخلخل مربوط به دانه‌بندی D بیشترین نفوذپذیری را از خود نشان می‌دهند. این دانه‌بندی بیشترین یکنواختی را دارا می‌باشد، لذا میزان نفوذپذیری با یکنواختی بافت دانه‌بندی ارتباط مستقیم دارد.

۴- طرح‌های ساخته شده از سنگ‌دانه‌های گرانیتی بیشترین مقاومت فشاری را کسب می‌کنند. همچنین طرح‌های با سنگ‌دانه مرمریت و آهکی به ترتیب در رده‌های دوم و سوم مقاومتی قرار دارند.

۵- در تمامی طرح‌ها بین مقاومت فشاری و نفوذپذیری ارتباط معکوس برقرار است (با ضریب همستگی ۰/۸۲) درحالی‌که میزان همستگی نتایج حاصله از تست مقاومت فشاری و تخلخل پایین است.

۶- نتایج تحلیل آماری با استفاده از نرم‌افزار MINITAB نشان می‌دهد حداکثر مقاومت فشاری در نواحی با نفوذپذیری کمتر از ۰/۵ سانتیمتر بر ثانیه و تخلخل کمتر از ۲۲ درصد حاصل می‌شود.

۷- طرح شماره ۱۰ که شامل سنگ‌دانه‌های گرانیتی است، بیشترین مقاومت فشاری را دارد؛ اما با توجه به هزینه بالای تهیه و دانه‌بندی سنگ‌دانه‌های گرانیتی، عمدتاً جز در موارد خاص استفاده از این سنگ‌دانه‌ها توصیه نمی‌شود. در اولویت بعدی طرح شماره ۶ که همان طرح اختلاط اما شامل سنگ‌دانه‌های آهکی است، توصیه می‌شود.

تشکر و قدردانی

در پایان لازم است از تمامی دوستان و همکاران که در انجام این تحقیق صمیمانه ما را یاری نمودند، همچنین دانشجویان عزیز و فرزانه گروه عمران دانشگاه لرستان کمال تشکر را داشته باشیم.

فشاری (f_c) در شکل ۸ آمده است، که مقدار آن در حدود ۸۴ درصد می‌باشد. در شکل ۸ محورهای افقی و عمودی به ترتیب بیانگر مقادیر تخلخل و نفوذپذیری نمونه‌ها بوده و کانتورهای رنگی مقادیر مقاومت فشاری را نشان می‌دهند. دقت در شکل مذکور نشان می‌دهد که اولاً حداکثر مقاومت فشاری در نواحی با نفوذپذیری کمتر از ۰/۵ سانتیمتر بر ثانیه و تخلخل کمتر از ۲۲ درصد هست، ثانیاً با تغییرات نفوذپذیری میزان مقاومت فشاری نیز تغییر کرده که این مطلب تحت‌عنوان همبستگی نتایج مقاومت فشاری با نفوذپذیری در شکل ۶ قبلاً ذکر شد؛ اما تغییرات تخلخل اثر کمتری در تغییرات مقادیر مقاومت فشاری دارد، که این مطلب قبلاً در شکل ۷ تحت‌عنوان عدم همبستگی نتایج حاصل از مقاومت فشاری با تخلخل ذکر شد. همچنین در هر سه نوع سنگ‌دانه مقاومت فشاری بالاتر در طرح اختلاط نمونه‌های با دانه‌بندی B حاصل می‌شود، که میزان نفوذپذیری نیز در این نمونه‌ها حداقل هست. پس از معرفی طرح اختلاط‌های شامل دانه‌بندی B به‌عنوان طرح‌های بهینه، طرح شماره ۱۰ که شامل سنگ‌دانه‌های گرانیتی است، بیشترین مقاومت فشاری را دارد؛ اما با توجه به هزینه بالای تهیه و دانه‌بندی سنگ‌دانه‌های گرانیتی، عمدتاً جز در موارد خاص استفاده از این سنگ‌دانه‌ها توصیه نمی‌شود. در اولویت بعدی طرح شماره ۶ که همان طرح اختلاط با دانه‌بندی B اما شامل سنگ‌دانه‌های آهکی است، توصیه می‌شود. که هم هزینه تمام شده کمتری نسبت به نمونه‌های گرانیتی دارد و هم مقادیر مقاومت فشاری، تخلخل و نفوذپذیری آن در محدوده مجاز هست.

۴ - نتیجه گیری

تأثیر جنس سنگ‌دانه‌ها و نوع دانه‌بندی بر تخلخل، مقاومت فشاری و نفوذپذیری بتن متخلخل، در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفت. همچنین در راستای این تحقیق و با استفاده از تحلیل رگرسیون خطی ارتباط بین مقاومت فشاری با نفوذپذیری و تخلخل به دست آمد. مهم‌ترین دستاوردهای این تحقیق به شرح زیر ارائه می‌شود:

۱- سنگ‌دانه‌های گرانیتی نسبت به سایر سنگ‌دانه‌ها دارای مقاومت سایشی بیشتر و درصد جذب آب و رطوبت کمتری

- [11] Schaefer, V.R., Wang, K., Suleiman, M.T. and Kevern, J.T. "Mix design development for pervious concrete in cold weather climates". No. Report No. 2006-01. 2006.
- [12] Kevern, J.T., Wang, K. and Schaefer, V.R., "Effect of coarse aggregate on the freeze-thaw durability of pervious concrete." *Journal of Materials in Civil Engineering* 22, no. 5 (2009): 469-475.
- [13] Kevern, J.T., Schaefer, V.R. and Wang, K., "Evaluation of pervious concrete workability using gyratory compaction." *Journal of Materials in Civil Engineering* 21, no. 12 (2009): 764-770.
- [14] ASTM C150. "Standard Specification for Portland Cement." (1999).
- [15] ASTM C136. "Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates." Philadelphia, PA: American Society for Testing and Materials, 1995.
- [16] ASTM C131, "Standard Test Method for Resistance to Degradation of Small-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine" ASTM International, West Conshohocken, PA, 2003, 4 pp.
- [17] ASTM C127, "Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Coarse Aggregate" ASTM International, West Conshohocken, PA, 2001, 6 pp.
- [18] ASTM C566, "Standard Test Method for Total Evaporable Moisture Content of Aggregate by Drying" ASTM International, West Conshohocken, PA, 2004, 3 pp.
- [19] ASTM C143, "Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete" West Conshohocken, PA.
- [20] ASTM C1688, "Standard Test Method for Density and Void Content of Freshly Mixed Pervious Concrete" ASTM International, West Conshohocken, PA, 2008, 3 pp.
- [21] ASTM C39, "Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens" ASTM International, West Conshohocken, PA, 2003, 7 pp.
- [22] ASTM C617, "Standard Practice for Capping Cylindrical Concrete Specimens" ASTM International, West Conshohocken, PA, 2003, 6 pp.
- [1] Tyring, S., Gottlieb, A., Papp, K., Gordon, K., Leonardi, C., Wang, A., Lalla, D., Woolley, M., Jahreis, A., Zitnik, R. and Cella, D. "Etanercept and clinical outcomes, fatigue, and depression in psoriasis: double-blind placebo-controlled randomised phase III trial." *The Lancet* 367, no. 9504 (2006): 29-35.
- [2] Haselbach, L. M., and B. S. Werner. "Pervious Concrete Performance in Eastern Washington: Surface Infiltration." In *International Low Impact Development Conference 2015@ sLID: It Works in All Climates and Soils*, pp. 196-205. ASCE, 2015.
- [3] Sanford, C., Onyango, M.A., Thomas, T.A., Jones, F. and Rollins, B. "Evaluation of Cleaning Methods of Pervious Concrete Pavement." In *International Symposium on Systematic Approaches to Environmental Sustainability in Transportation*. 2015. pp 58-70.
- [4] Huang, B., Wu, H., Shu, X. and Burdette, E.G. "Laboratory evaluation of permeability and strength of polymer-modified pervious concrete." *Construction and Building Materials* 24, no. 5 (2010): 818-823.
- [5] Ghafoori, N. and Dutta, S. "Development of no-fines concrete pavement applications." *Journal of transportation engineering* 121, no. 3 (1995): 283-288.
- [6] ACI Committee 522R-06, "Pervious concrete", (2006).
- [7] Wang, K., V. R. Schaefer, J. T. Kevern, and M. T. Suleiman. "Development of mix proportion for functional and durable pervious concrete." In *Proceedings of the 2006 NRMCA Concrete Technology Forum—Focus on Pervious Concrete*. 2006.
- [8] Zhong, R., & Wille, K. "Material design and characterization of high performance pervious concrete." *Construction and Building Materials* 98, no. 15 (2015): 51-60,
- [9] Ho, C.H., Shan, J., Almutairi, F. and Aloqaili, F. "Evaluating the Freeze Thaw Durability of Pervious Concrete Mixed with Silica Fume." In *International Symposium on Systematic Approaches to Environmental Sustainability in Transportation*. 2015. pp 83-92.
- [10] شریفی، ج.، نیکودل، م.، ر.، یزدانی، م. "تأثیر جنس سنگدانه‌ها بر سرعت انتشار امواج فشاری در بتن". هشتمین کنگره بین‌المللی مهندسی عمران، دانشگاه شیراز، ۲۱ تا ۲۳ اردیبهشت ۱۳۸۸.

Investigation of effective parameters in preparation of pervious concrete

Majid Rostami Galehdar*
Isfahan University of Technology master of sciences student
Iman Bahrami Chegeni
Lorestan University member of scientific board and Civil Engineering dean

Abstract

In most developed countries, pervious and permeable concrete pavements are regularly used in sidewalks, parks or low-volume roads such bicycle lanes and car parks, and are considered an excellent alternative to hard impervious traditional pavements. Increasing global popularity of pervious concrete pavements is because of their economic, environmental and technical advantages primarily achieved by their ability to allow water to easily pass through. In this paper, we aimed to produce a pervious concrete that would satisfy porosity and permeability requirements, while providing better load bearing, compressive strength and workability. To achieve this objective, aggregates of different materials with different physical and chemical properties and gradations were mixed with different proportions of admixtures and cement to produce a variety of pervious concretes with different strengths. Produced concretes were sampled and samples were put to slump, compressive strength, porosity and permeability tests. After evaluation and analysis of obtained results, the best mix design that would conform to regulations and would also satisfy the strength and economic factors was introduced.

Keywords: pervious concrete, permeability, aggregate, compressive strength, porosity.

* Corresponding Author: Majid.rostami1@cv.iut.ac.ir

